

DOI: <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.2.214450>  
УДК 621.3/548.25/548.5/67.02/67.05

В.В. Цибуленко<sup>1\*</sup>, С.В. Шутов<sup>1</sup>, О.О. Боскін<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup>Херсонський національний технічний університет, Херсон, Україна

\*corresponding author: v-ts@ukr.net

## НАНЕСЕННЯ ОМІЧНОГО КОНТАКТУ Al/SnAl НА КРЕМНІЙ З РІДИННОЇ ФАЗИ

**Проблематика.** Металеві одно- та багатошарові плівки широко використовують в електроніці та оптоелектроніці, зокрема як омичні контакти. Зазвичай ці плівки наносять методами термічного випаровування, іонного розпилення та хімічного осадження з газової фази. Однак методи осадження з рідинної фази є найдешевшими та найпростішими, тому нанесення омичних контактів з їх допомогою є актуальним завданням.

**Мета дослідження.** Вивчити можливості отримання багатошарових омичних металевих плівок на поверхні напівпровідникової пластини з рідинної фази, зокрема методом скануючої рідиннофазної епітаксії (СРФЕ).

**Методика реалізації.** Розглянуто вплив тривалого в часі градієнта температури на межі контакту металевого розчину-розплаву з напівпровідниковою пластиною на нанесення багатошарових омичних металевих плівок на поверхню напівпровідникової пластини за сегментарного контакту розчину-розплаву з пластиною. Для цього змодельовано процеси теплопередачі, процеси змочування пластини, а також її очищення від розчину-розплаву з урахуванням капілярних явищ у щілинах маски за методу СРФЕ. Для експериментального підтвердження дієвості запропонованої моделі нанесено шар Al/SnAl на кремнієву пластину в зазначених умовах.

**Результати дослідження.** Методом СРФЕ за використання додаткового підігрівача пластини та маски в установці нанесено контактний шар Al/SnAl на поверхні кремнію з розчину-розплаву Al-Sn. Контактний шар виготовлено як три однакові за розміром доріжки, розташовані на різній відстані. За допомогою аналізу вольт-амперної характеристики визначено, що контакт нанесеної металеві плівки на поверхню напівпровідника є непрямым, тобто омичним. Планарним методом лінії передачі з використанням лінійної конфігурації контактних доріжок (LTLM, Linear Transmission Line Method) визначено питомий контактний опір, який становить  $7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ .

**Висновки.** Показано можливість отримання методом СРФЕ багатошарових омичних контактів до напівпровідника в умовах сегментарного контакту розчину-розплаву з пластиною та тривалого в часі градієнта температури на межі контакту. Ці умови реалізовано за допомогою додаткового підігріву пластини з її тильної сторони та високотемпературної маски, крізь щілини якої розчин-розплав контактує з пластиною.

**Ключові слова:** скануюча рідиннофазна епітаксія; контактна сітка; сонячні елементи; кремній.

### Вступ

Нанесення металеві плівки на поверхню напівпровідників активно використовують для створення омичних контактів у приладах сучасної електроніки й оптоелектроніки зокрема. Нині основними методами нанесення контактної сітки є методи термічного випаровування, іонного розпилення та хімічного осадження з газової фази (парогазової суміші) [1–3].

На жаль, роботи з нанесення омичних контактних металевих плівок методами осадження з рідинної фази досі невідомі. Адже, у порівнянні з описаними методами, методи отримання епітаксійних плівок із рідинної фази є найдешевшими та найпростішими, а тому й доступними для широкого застосування [4, 5]. Тож актуальним є нанесення контактної сітки з рідинної фази. Одним із різновидів рідиннофазо-

вого осадження є метод СРФЕ, докладно описаний у роботах [6, 7]. Однією з його особливостей є можливість сегментарно отримати епітаксійні плівки на поверхні напівпровідникової пластини.

Відомо, що в недорогих сонячних елементах із монокристалічного кремнію вже досить довго використовують алюміній як омичний контакт [8–10]. Наносять його переважно методами термічного випаровування чи іонного розпилення. Сегментарне нанесення такого омичного контакту з рідинної фази здешевило б вартість зазначених сонячних елементів.

### Постановка задачі

Показати можливість отримання омичних металевих плівок на поверхні напівпровідникової пластини методом СРФЕ.

## Теорія

Основна ідея полягає в тому, що з рідинної фази в умовах градієнта температури на фронті контакту можна нанести на поверхню напівпровідникової пластини багат шарову металеву контактну плівку, подібну до сітки, з одночасною її термообробкою. Зробити це можна, використовуючи маску з високотемпературного матеріалу, крізь яку розчин-розплав контактуватиме з напівпровідниковою пластиною.

Щоб перевірити запропоновану ідею, було розраховано технологічні режими нанесення шару Al/SnAl на пластину кремнію з розчину-розплаву Al-Sn методом СРФЕ. У методі СРФЕ змочування напівпровідникової пластини розчином-розплавом і її очищення може здійснюватися за допомогою сили Ампера. Розрахунок відповідних технологічних режимів наведено в [6]. Проте в нашому випадку між напівпровідниковою пластиною та розчином-розплавом знаходиться маска з досить вузькими щілинами. Очевидно, що в щілинах виникатиме додаткова різниця тисків унаслідок капілярних явищ, що заважатиме змочуванню пластини розчином-розплавом. Розчин-розплав доведеться проштовхувати в щілини маски з додатковою силою, щоб змочити пластину. Тому нами було побудовано нову модель режимів змочування напівпровідникової пластини та її очищення від розчину-розплаву з урахуванням капілярних явищ у щілинах маски.

Нехай розчин-розплав не змочує стінки щілини маски повністю. Тоді запишемо силу Ампера, необхідну для змочування пластини крізь маску, з урахуванням [6]:

$$\vec{F}_{cap} + \vec{F}_g < \vec{F}_A \leq \vec{F}_g + \vec{F}_c, \quad (1)$$

де  $\vec{F}_{cap}$ ,  $\vec{F}_c$ ,  $\vec{F}_g$ ,  $\vec{F}_A$  – вектори капілярних сил, сил когезії, тяжіння й Ампера, що діють на розчин-розплав, відповідно.

Розписавши (1) через розміри комірки, можна знайти значення струму, який необхідно пропускати крізь розчин-розплав за заданого значення індукції магнітного поля:

$$4\sigma_{sm}W + \rho_{sm}Vg < I_w(z)B(z)l_y \sin \alpha \leq \rho_{sm}Vg + 2\sigma_{sm}L_{sm}$$

або

$$\frac{4\sigma_{sm}W + \rho_{sm}Vg}{B(z)l_y \sin \alpha} < I_w(z) \leq \frac{\rho_{sm}Vg + 2\sigma_{sm}L_{sm}}{B(z)l_y \sin \alpha}; \quad (2)$$

$$\rho_{sm} = \rho_{Sn}(1-x) + \rho_{Al}x, \quad (3)$$

де  $V$  – об'єм ростового капіляра, м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $I_w(z)$  – загальний струм крізь розчин-розплав для змочування пластини розчином-розплавом,  $A$ ;  $B(z)$  – індукція магнітного поля, в якому перебуває розчин-розплав, Тл;  $l_y$  – розмір розчину-розплаву по осі ОУ, м;  $\sin \alpha = 1$ , оскільки кут між  $I_w$  і  $B \in 90^\circ$ ;  $\sigma_{sm}$  – поверхневий натяг розчину-розплаву, Н/м;  $L_{sm}$  – довжина контуру розчину-розплаву у ростовому капілярі у площині XY, м;  $\rho_{sm}$ ,  $\rho_{Sn}$ ,  $\rho_{Al}$  – густина розчину-розплаву, олова й алюмінію відповідно, кг/м<sup>3</sup>;  $x$  – мольна частка алюмінію [11, 12],  $W$  – ширина щілини, м.

Щоб після нанесення на підкладці залишився досить товстий “залишковий” шар розчину-розплаву, що буде виконувати роль контактної сітки, необхідно, щоб сила Ампера була зосереджена в середині розчину-розплаву на відстані від поверхні контакту  $i$ , відповідно, була більшою за силу когезії розчину-розплаву. Тоді умову очищення пластини від розчину-розплаву можна записати:

$$\vec{F}_A \geq \vec{F}_g + \vec{F}_c$$

або

$$I_c(z) \geq \frac{-\rho_{sm}Vg + 2\sigma_{sm}L_{sm}}{B(z)l_y \sin \alpha}, \quad (4)$$

де  $I_c(z)$  – величина загального струму крізь розчин-розплав для очищення напівпровідникової пластини від розчину-розплаву,  $A$ .

Для знаходження розподілу струму в розчині-розплаві та напівпровідникової пластині розглянуто двовимірну модель, бо ростова комірка має прямокутну форму та обмежена високотемпературним ізолятором уздовж напрямку струму. Тоді рівняння Пуассона для скалярного електричного потенціалу  $U$  чи рівняння Лапласа в двовимірному випадку можна записати:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0. \quad (5)$$

Вектор щільності струму:

$$J_{dreif} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial y}, \quad J_{diff} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U}{\partial z}. \quad (6)$$

Крайові умови мають вигляд:

$$- \text{на зовнішніх границях: } J_n = 0; \quad (7)$$

$$- \text{на внутрішніх границях: } J_n^- + J_n^+ = 0, \quad (8)$$

де  $J_n$  – нормальна компонента вектора щільності струму (індекси “-” і “+” задають

“ліворуч” і “праворуч” від границі відповідно);  $\rho$  – питомий опір, Ом·см.

Вирішуючи сумісно рівняння (2–4) та (5–8), можна знайти  $I_w(z)$  і  $I_c(z)$ .

Ростова комірка для моделювання розтікання струму та теплових процесів зображена на рис. 1. Результати розрахунку наведено на рис. 2 і 3.

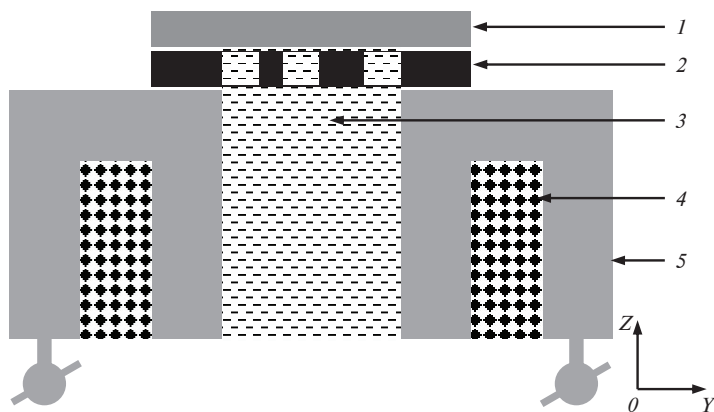


Рис. 1. Схематичне зображення ростової комірки з маскою та підкладкою зверху: 1 – кремнієва підкладка; 2 – маска зі щілинами; 3 – Al-Sn розчин-розплав; 4 – високотемпературний ізолятор; 5 – контакт із титану

Результати розрахунку загального струму крізь ростову комірку для змочування пластини розчином-розплавом показують, що сума  $\vec{F}_{cap} + \vec{F}_g$  більша за  $\vec{F}_g + \vec{F}_c$ . Це означає, що маска має щільно прилягати до ростової комірки для уникнення виливання розчину-розплаву назовні. Величина  $I_w$  за такої умови має бути більшою за 31 А.

Загальний струм крізь ростову комірку для очищення пластини від розчину розплаву має бути  $I_c > 7$  А. Мале значення, порівняно зі стру-

мом для змочування, можна пояснити суттєвим вкладом сили тяжіння.

Розрив розчину-розплаву під дією сили Ампера відбудеться там, де сила буде максимальною. З рис. 2, а видно, що розрив відбудеться в середині розчину-розплаву, на відстані близько 1 мм від фронту контакту.

З рис. 2, б видно, що сила Ампера буде більшою в проміжках між щілинами. Це можна пояснити розтіканням струму в розчин-розплав у щілинах. Отже, розчин-розплав має легше зніматися з маски та залишатися в щілинах, що й потрібно. Так на поверхні пластини має залишитися досить товстий шар розчину-розплаву, що був зосереджений у щілинах.

Під час нанесення з рідинної фази багат шарова плівка буде осаджена на поверхні напівпровідникової пластини внаслідок зміщення фазової рівноваги через зниження температури. Наприклад, для системи Al-Sn за зниження температури першим буде осаджуватися більш високотемпературний алюміній. Проте

для створення омичного контакту з напівпровідником необхідно, щоб метал частково дифундував у напівпровідникову пластину. Саме для цього потрібен тривалий у часі градієнт температури на фронті контакту – металевий шар, що прилягає до напівпровідникової пластини, повинен дифундувати в неї, але водночас не розчиняється у розчині-розплаві. У роботі [7] показано, що в методі СРФЕ такий градієнт температури можна досягти за використання додаткового нагрівача пластини з її тильної сторони.

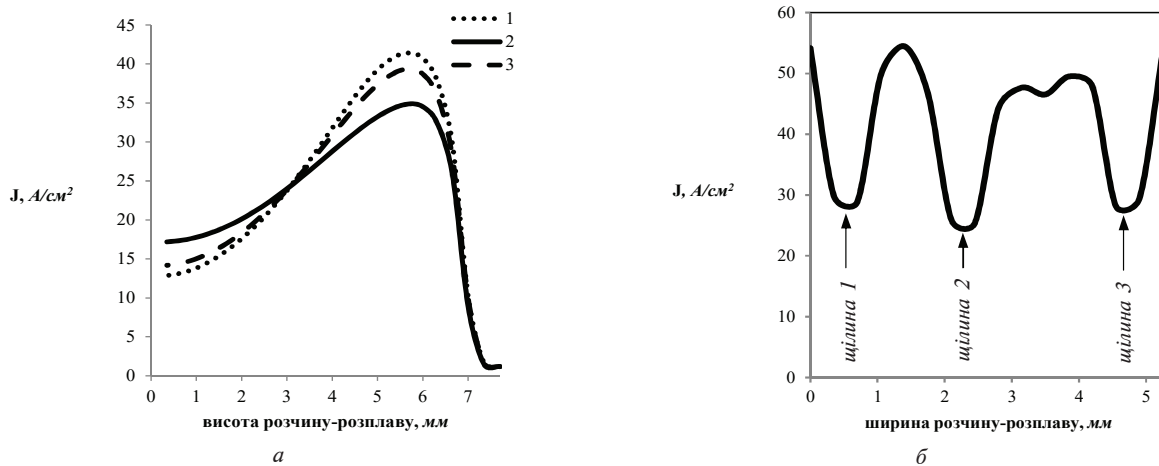


Рис. 2. Розподіл щільності струму по висоті розчину-розплаву (1 – навпроти першої щілини, 2 – другої та 3 – третьої) (а) та розподіл щільності струму по ширині розчину-розплаву на межі з маскою (б)

Ще одним важливим елементом є те, що, згідно з фазовою рівновагою Si-Al [9, 11], кремній починає розчинятись в алюмінії уже за 577 °С. Щоб запобігти розчиненню матеріалу напівпровідникової пластини з подальшим його осадженням, нанесення контактного шару та його термообробку слід проводити за температур нижче 577 °С.

Відомо, що типовий час термообробки після нанесення алюмінію на кремній для омичних контактів складає понад 5 хв за температури близько 550 °С. Для зазначеного контакту розчину-розплаву з пластиною для нашої структури проведено розрахунок теплопередачі згідно з [6]. Товщину осадженого за зниження температури алюмінію не обраховували, оскільки ця величина не принципова. Моделювання температурно-часового режиму (рис. 3) нанесення Al/SnAl плівки методом СРФЕ з використанням додаткового нагрівача пластини показало, що для досягнення температури 550 °С на фронті контакту необхідно, щоб початкова температура Sn-Al розчину-розплаву була 610 °С. Потрібні для розрахунку вхідні параметри наведено в табл. 1.

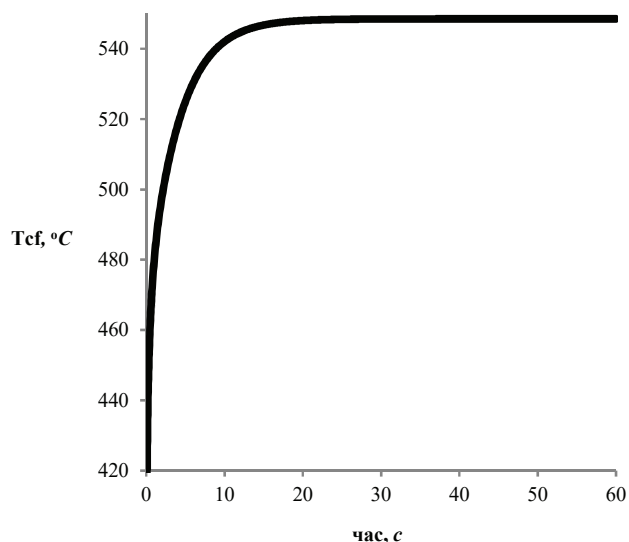


Рис. 3. Залежність температури на фронті контакту  $T_{cf}$  від часу

З рис. 3 видно, що вже менше ніж за 30 с на фронті контакту спостерігаємо сталий у часі градієнт температури, що не перевищує температуру початку розчинення кремнію в алюмінії.

Таблиця 1. Вхідні параметри

Параметр	Розмірність	Величина	Джерело
Розміри ростового капіляра	мм	$4 \times 5 \times 7$	—
Розподіл напруженості магнітного поля по висоті розчину-розплаву	мТл	$0,8d_{sm}^2 + 11,6d_{sm} + 78,1$	[7]
Товщина кремнієвої пластини	мм	0,7	—
Товщина маски	мм	0,7	—
Максимальна температура нагрівача пластини (у верхній частині)	°C	775	—

### Технологія нанесення

Для перевірки запропонованої ідеї та розрахунків проведено експеримент із нанесення шару Al/SnAl (Sn 95 % по масі) на кремнієву пластину з Al-Sn розчину-розплаву. Пластина монокристалічного кремнію мала *n*-тип провідності, орієнтацію (111) та питомий опір 0,03 Ом · см.

Обробляли кремній так: знежирювали кип'ятінням протягом 10 хв у толуолі, а потім 10 хв в ізопропіловому спирті, сушінням у парах ізопропілового спирту. Хімічне травлення матеріалів проводили в травильних композиціях  $\text{HNO}_3 : \text{HF} : \text{CH}_3\text{COOH} = 3 : 1 : 1$  протягом 3 хв. Після травлення промивали в дистильованій воді та сушили на фільтрувальному папері. Маса компонентів, необхідних для виготовлення насиченого розчину-розплаву, розраховували за діаграмами стану системи Al-Sn [11, 12]. Зважували компоненти на мікроаналітичних вагах ВЛР-200 класу точності 2.

Нанесення проводили на експериментальній установці для СРФЕ з додатковим нагрівачем пластини з її тильної сторони [7]. Початкові температури розчину-розплаву та поверхні пластини становили 610 °С та 270 °С відповідно. Час контакту розчину-розплаву з напівпровідниковою пластиною — 5 хв.

Для нанесення сегментів росту (контактної сітки) на поверхню напівпровідникової пластини виготовили маску зі слюди з відповідними розмірами щілин. Цю маску розмістили між ростовою коміркою та пластиною. Нанесена методом СРФЕ крізь маску металева контактна сітка на поверхні пластини показано на рис. 4, а, а її розміри — на рис. 4, б.

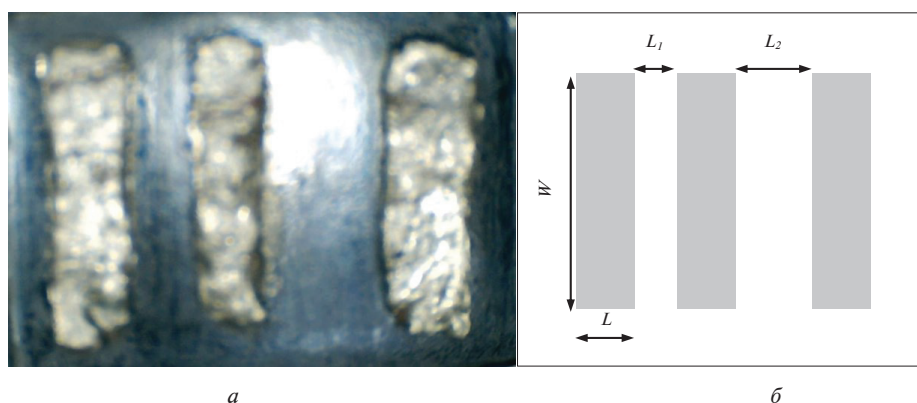


Рис. 4. Поверхня кремнієвої пластини з нанесеним контактним шаром Al/SnAl (а) та його розміри (б):  $W = 3,8$  мм,  $L = 1,1$  мм,  $L_1 = 0,7$  мм та  $L_2 = 1,3$  мм

Такий вибір контактної сітки, що складається з ряду ідентичних прямокутних доріжок із шириною  $W$  і довжиною  $L$ , розташованих зі змінним інтервалом  $L_i$ , обумовлений подальшим використанням методу LTLM (Linear Transmission Line Method) для дослідження якості отриманого омичного контакту.

#### Дослідження зразків й обговорення

Для дослідження якості отриманих контактних шарів використано метод аналізу вольт-амперної характеристики та планарний метод LTLM. Результати вимірювання вольт-амперних характеристик між 1–2 та 2–3 контактними доріжками наведено на рис. 5.

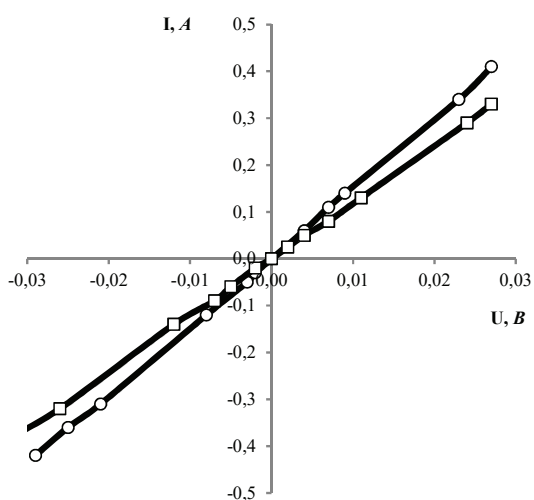


Рис. 5. Вольт-амперна характеристика планарної структури Al/SnAl на кремнії

З рис. 5 видно, що форма вольт-амперної характеристики є лінійною в одному й іншому

напрямах струму, тож контакт нанесеної металевої плівки на напівпровідник є невідпрямним, тобто омичним.

Оцінимо питомий контактний опір за методом LTLM. Якщо через два найближчі контакти (рис. 4) пропускати струм, то повний опір складається з двох компонентів [3, 13]:

$$R = \frac{U}{I} = 2 \cdot R_c + \frac{R_{sh} L_i}{W}$$

де  $U$  – напруга між двома найближчими доріжками, В;  $I$  – струм між двома найближчими доріжками, А;  $R$  – загальний опір між двома найближчими доріжками, Ом;  $R_c$  – контактний опір доріжки, Ом;  $R_{sh}$  – питомий поверхневий опір напівпровідникової пластини між двома найближчими доріжками, Ом/□;  $L_i$  – відстань між двома найближчими доріжками, см;  $W$  – ширина доріжок, см.

Вимірюючи струм і падіння напруги між кожними найближчими доріжками, можна побудувати залежність (рис. 6).

З рис. 6 можна визначити контактний опір доріжок. Спочатку знайдемо контактний опір нанесеної контактної сітки. Його визначають графічно: точка перетину лінії тренду на осі опорів покаже контактний опір двох доріжок, тобто  $2 \cdot R_c$ . Якщо вважати контактні опори доріжок однаковими, то розділивши це значення на 2, отримуємо значення контактного опору однієї доріжки. Питомий поверхневий опір напівпровідникової пластини між двома найближчими доріжками можна записати:

$$R_{sh} = \frac{\Delta R}{\Delta L_x} W$$

де  $\frac{\Delta R}{\Delta L_x}$  – тангенс кута нахилу прямої на рис. 6.

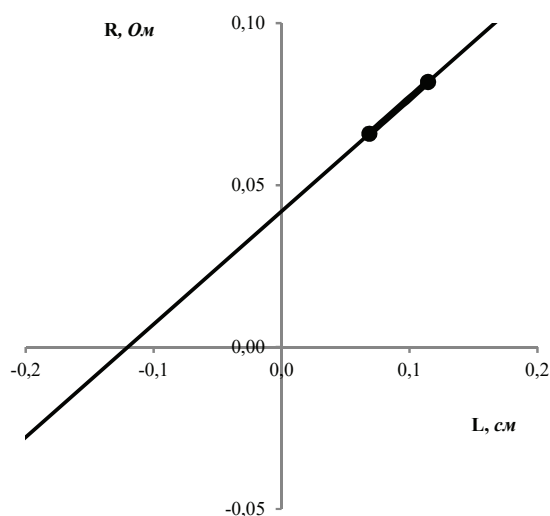


Рис. 6. Залежність загального опору  $R$  від відстані між контактними доріжками  $L$ , планарної структури Al/SnAl на кремнії

Тоді питомий контактний опір можна знайти за формулою:

$$\rho_c = R_{sk} L_T^2$$

де  $L_T$  – довжина перенесення, см;  $R_{sk}$  – питомий поверхневий опір шару напівпровідника під металізацією, Ом/□.

Довжина перенесення – відстань, на яку переноситься струм від краю вглиб контакту. Якщо вважати, що  $R_{sk} = R_{sh}$  і  $L_T = L_x / 2$  (де  $L_x$  – довжина відрізка, яку лінія тренду відсікає на осі довжин), то питомий контактний опір становить:

тyme:  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Ом · см<sup>2</sup>. Оскільки на рис. 6 було нанесено лише дві точки, то отримане значення контактного опору не є точним, але можна вважати його оцінним.

## Висновки

Методом СРФЕ на поверхню кремнієвої пластини нанесено з Al-Sn розчину-розплаву контактний шар Al/SnAl, що має питомий контактний опір  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Ом · см<sup>2</sup>.

Показано принципову можливість отримання методом СРФЕ багатошарових металевих омичних контактних плівок як сіток на поверхні напівпровідника з одночасною їх термообробкою за нанесення в умовах сегментарного контакту розчину-розплаву з напівпровідниковою пластиною та тривалого в часі градієнта температури на межі контакту. Ці умови реалізовані у методі СРФЕ за використання додаткового підігріву пластини з її тильної сторони та високотемпературної маски, крізь яку розчин-розплав контактує з пластиною.

Метод СРФЕ дає змогу отримувати сегментарні по поверхні пластини шари будь-яких матеріалів, що розчиняються в легкоплавких металах-розчинниках. Ці метали-розчинники теж можуть бути використані як металеві контактні шари до напівпровідників. Тому нанесення металевих багатошарових омичних контактних плівок на напівпровідникові пластини з рідинної фази (зокрема, методом СРФЕ) варто дослідити детальніше.

## References

- [1] A. Ozkartal, "Characterization of the ITO/p-Si/Al contacts produced by thermal evaporation," *Vacuum*, vol. 168, p. 108799, 2019. doi: 10.1016/j.vacuum.2019.108799
- [2] G. Zhu *et al.*, "Molecular dynamics simulation of temperature effects on deposition of Cu film on Si by magnetron sputtering," *J. Crystal Growth*, vol. 492, pp. 60–66, 2018. doi: 10.1016/j.jcrysgro.2018.04.002
- [3] S. Wahid *et al.*, "Barrier heights and Fermi level pinning in metal contacts on p-type GaN," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 116, no. 21, p. 213506, 2020. doi: 10.1063/5.0010699
- [4] C.D. Noorzad, "A cost-effective liquid phase epitaxy process for high-efficiency AlGaAs/GaAs solar cells," M.S. thesis, Electr. Comput. Eng., Univ. California, Davis, United States, 2017.
- [5] Z. Xin, "Applications of liquid phase epitaxy in optoelectronic devices," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., UC Davis, Davis, CA, 2016.
- [6] V. Tsybulenko *et al.*, "Determination of crystallization conditions of Ge/GaAs heterostructures in scanning LPE method," *Semicond. Phys., Quantum Electron. & Optoelectron.*, vol. 23, no 3, pp. 294–301, 2020. doi: 10.15407/spqeo23.03.294
- [7] V. Tsybulenko *et al.*, "The features of scanning liquid phase epitaxy technique as applied to thick epitaxial layers growth," *KPI Sci. News*, no. 3, pp. 58–64, 2020. doi: 10.20535/kpi-sn.2020.3.197877
- [8] K. Bendjebbar *et al.*, "Numerical analysis of metal-semiconductor junctions ITO/p-a-Si:H and n-c-Si/Al on silicon heterojunction solar cells," *Optik*, vol. 212, p. 164741, 2020. doi: 10.1016/j.ijleo.2020.164741
- [9] A. Herguth, "Finite element simulation of the local Al/Si contact formation," *Energy Procedia*, vol. 92, pp. 75–81, 2016. doi: 10.1016/j.egypro.2016.07.018
- [10] E. Urrejola *et al.*, "Al-Si alloy formation in narrow p-type Si contact areas for rear passivated solar cells," *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 12, p. 124516, 2010. doi: 10.1063/1.3437070
- [11] M. Glazov *et al.*, *Casting Aluminium Alloys. Their Physical and Mechanical Metallurgy*. Butterworth-Heinemann, 2018. doi: 10.1016/C2015-0-02446-7

- [12] *State diagrams of double metal systems*, vol. 2, N.P. Lyakishev, Mashinostroyeniye, Moscow, Russia, 1997, pp. 212–216.  
[13] L. Benharrat *et al.*, “Stabilization of copper solar cell contacts by spin coated titanium dioxide thin films,” in *Proc. Solartr Conf. Exhibition*, Istanbul, Turkiye, 2018, pp. 11–19.

V.V. Цыбуленко, С.В. Шутов, О.О. Боскин

#### НАНЕСЕНИЕ ОМИЧЕСКОГО КОНТАКТА Al/SnAl НА КРЕМНИЙ ИЗ ЖИДКОЙ ФАЗЫ

**Проблематика.** Металлические одно- и многослойные пленки широко используют в современной электронике и оптоэлектронике в частности в качестве омических контактов. Обычно эти пленки наносят методами термического испарения, ионного распыления и химического осаждения из газовой фазы. Однако методы осаждения из жидкой фазы являются самыми дешевыми и простыми, поэтому нанесение омических контактов при их помощи является актуальной задачей.

**Цель исследования.** Изучить возможности получения многослойных омических металлических пленок на поверхности полупроводниковой пластины из жидкой фазы, в частности методом сканирующей жидкофазной эпитаксии (СЖФЭ).

**Методика реализации.** Рассмотрено влияние длительного во времени градиента температуры на границе контакта металлического раствора-расплава с полупроводниковой пластиной на нанесение многослойных омических металлических пленок на поверхность полупроводниковой пластины при сегментарном контакте раствора-расплава с пластиной. Для этого смоделированы процессы теплопередачи, процессы смачивания пластины, а также ее очищение от раствора-расплава с учетом капиллярных явлений в щелях маски установки СЖФЭ. Для экспериментального подтверждения работоспособности предложенной модели был нанесен слой Al/SnAl на кремниевую пластину в указанных условиях.

**Результаты исследования.** Методом СЖФЭ с использованием дополнительного подогревателя пластины и маски в установке нанесен контактный слой Al/SnAl на поверхности кремния из раствора-расплава Al-Sn. Контактный слой изготовлен в виде трех одинаковых по размерам дорожек, расположенных на разном расстоянии. При помощи анализа вольтамперной характеристики определено, что контакт нанесенной металлической пленки на поверхность полупроводника является невыпрямляющим, то есть омическим. Планарным методом линии передачи с использованием линейной конфигурации контактных площадок (LTLM, Linear Transmission Line Method) определено удельное контактное сопротивление, которое составляет  $7,2 \cdot 10^{-4}$  Ом·см<sup>2</sup>.

**Выводы.** Показана возможность получения методом СЖФЭ многослойных омических контактов к полупроводнику в условиях сегментарного контакта раствора-расплава с пластиной и длительного во времени градиента температуры на границе контакта. Эти условия реализованы при помощи дополнительного подогрева пластины с ее тыльной стороны и высокотемпературной маски, через щели которой раствор-расплав контактирует с пластиной.

**Ключевые слова:** сканирующая жидкофазная эпитаксия; контактная сетка; солнечные элементы; кремний.

V.V. Tsybulenko, S.V. Shutov, O.O. Boskin

#### DEPOSITION OF Al/SnAl OHMIC CONTACT ON SILICON FROM A LIQUID PHASE

**Background.** Single- and multi-layer metal films are widely utilized in modern electronics and optoelectronics as ohmic contacts. As a rule, the films are deposited by thermal evaporation, ion sputtering and chemical vapour deposition. However the methods of deposition from a liquid phase are the most simple and cost-effective. Thus the ohmic contact deposition by these methods is still an actual problem.

**Objective.** The purpose of the paper is to study the possibility of deposition of multi-layer ohmic metal films over a semiconductor wafer surface from a liquid phase, particularly by scanning liquid phase epitaxy technique.

**Methods.** In this work we considered the influence of a long-term temperature gradient at the interface metallic solution-melt – semiconductor wafer on the possibility of deposition of multi-layer ohmic metal films on the semiconductor wafer surface during segmental contact between the solution-melt and the wafer. For this purpose we carried out the simulation of heat transport process, wafer wetting process as well as the process of wafer cleansing off the solution-melt taking into account capillary phenomena in the mask openings using the method of scanning liquid phase epitaxy. For experimental confirmation of adequacy of the model proposed we carried out the deposition of Al/SnAl layer on silicon wafer in the above mentioned conditions.

**Results.** We have deposited the contact layer Al/SnAl on the surface of silicon wafer from Al-Sn solution-melt by scanning liquid phase epitaxy technique using supplementary heater for the wafer and mask installed in the apparatus. The contact layer is made as three identical pads located at different distance one from each other. By the analysis of current-voltage characteristic we determined that the metallic film contact with the semiconductor is a non-rectifying, i.e. ohmic contact. The specific contact resistance was determined by the Transmission Line Method using linear configuration of the contact pads (LTLM). Its value was  $7.2 \cdot 10^{-4}$  Ohm·cm<sup>2</sup>.

**Conclusions.** The principal possibility of obtaining of multi-layer ohmic contacts to the semiconductor by scanning liquid phase epitaxy technique in conditions of segmental contact between the solution-melt and the wafer as well as long-term gradient at the contact interface was shown. The conditions were realized by using extra heating of the wafer back side and the high-temperature mask through which the solution-melt contacted the wafer.

**Keywords:** scanning liquid phase epitaxy; contact grid; solar cells; silicon.

Рекомендована Радою  
Інститут матеріалознавства та зварювання  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
15 жовтня 2020 року

Прийнята до публікації  
00 березня 2021 року